

# 如何應用中學物理尋找系外行星

曾耀寰

中央研究院天文及天文物理研究所

聯絡人 E-mail：yhtseng@asiaa.sinica.edu.tw

## 摘要

人類是宇宙中的孤兒嗎？地球上的生命、乃至高等文明是宇宙的唯一嗎？長久以來，人類不僅對這個問題感到好奇，也不斷地尋求解答，希望能在太陽系外找尋類似地球的行星系統。尋系外行星的難度很高，除了少數系外行星可以直接透過望遠鏡直接觀測，天文學家常用間接的方式尋找系外行星，方法包括天文測量學，視向速度測量學，波霎定時，重力微透鏡效應和行星凌。在這些間接觀測方法中，視向速度測量和行星凌可以用中學物理所學，瞭解天文學家如何尋找系外行星，本文從中學物理的角度介紹視向速度測量和行星凌，並根據行星凌原理設計製作行星凌的模型，達到演示尋找系外行星的目的。

**關鍵詞：**系外行星、都卜勒效應、行星凌、天文學、光度學、教學演示

## 壹、前言

臺灣的物理教育從國中開始有較為系統的學習和介紹，物理和化學在國中階段是合併在一起，稱為《理化》，到了高中一年級有《基礎物理》，是一學期的課程。升到高二，學生開始分組，雖有不同的組別，但在學習課程上，主要分為自然和社會兩大類別，自然組在高二所學的是《基礎物理二 B》(上)(下)兩本，高三則是《高中選修物理》(上)(下)兩本。在《基礎物理》部分，主要是對物理的定性描述，《基礎物理二 B》主要針對古典物理的部分，包括力學、流體和熱學，《高中選修物理》則是波動、電磁學和近代物理。

近代天文學離不開物理學，對於宇宙更深入的瞭解必須透過物理的解釋才能達成。從物理學的角度，各個時代的偉大物理學家嘔心瀝血所得到的成果，也都能在遙遠宇宙的角落得以運用。一顆從樹上掉落的蘋果，竟然和月亮能夠懸掛在天上有相同的原理，牛頓看清之間的關連，1787年，在《原理》一書中提出了萬有引力定律。就是這個定律，讓亞當斯（John Couch Adams）能夠算出一顆從未發現的太陽系新行星，並在1846年由其他天文學家找到他所預測的行星—海王星。

尋找行星不僅只是在尋找記錄排行榜上多加一筆，尋找未知的行星，甚至是尋找太陽系外的行星，代表了宇宙存

有其他文明的可能性。人類是宇宙中的孤兒嗎？地球上的生命、乃至高等文明是宇宙的唯一嗎？長久以來，人類不僅對這個問題感到好奇，也不斷地尋求解答，希望能在太陽系外找尋類似地球的行星系統，甚至外星人。隨著哥白尼日心說的提出，將人是宇宙的唯一這種思維打破，尋找人類以外的世界，只剩下技術上的問題。

尋找系外行星的方法可分成直接和間接方式兩類，直接的方式就是用望遠鏡直接看到繞著恆星的系外行星，所使用的望遠鏡不僅限於可見光望遠鏡。間接找尋的方式則有天文測量學、波霎定時、重力微透鏡法、視向速度測量學和行星凌等方法。除去天文觀測的技術外，間接找尋系外行星的基本物理原理大多可以在中學物理內找到。

本論文從中學物理的角度探討尋找系外行星的觀測原理，主要著重在視向速度測量學和行星凌兩種。視向速度測量學主要需要瞭解光譜以及光的都卜勒效應，而行星凌則需要知道克卜勒行星運動定律。此外我們還依行星凌原理製作實體的模型，演示行星凌的觀測過程。該演示不僅提供中學物理所學的驗證，實際瞭解天文學家如何尋找系外行星。

## 貳、觀測方法

根據恆星形成的理論，行星會在恆星四周的拱星盤上誕生，一般將觀測系

外行星的方式分成直接觀測和間接觀測，由於行星的大小和亮度遠小於母星，從觀測的角度，不論是亮度的對比或者是空間上的解析度都是很大的挑戰。

### 一、直接觀測

直接觀測系外行星最大的困難點在行星和母恆星之間的亮度對比太大，並且二者的距離太近，很難透過望遠鏡分辨出來，這種狀況就像是在 700 公里外看一座燈塔，燈塔就像是一顆母恆星，而系外行星就像是離燈塔 30 公分的一隻螢火蟲。但隨著觀測技術的進步，例如自適光學(adaptive optics)、日冕儀(coronagraph)以及化零干涉法(nulling interferometry)等，天文學家還是能針對一些特定的系外行星進行直接觀測，進行拍照攝影。

### 二、間接觀測

間接觀測的意思表示天文學家觀測到其他現象，經由已知的物理原理，推論系外行星的存在。根據高二上第三章《靜力學》所提的質心觀念，在一個恆星行星系統中，二者都是繞著共同的質心旋轉(如圖 1)。由於恆星的質量遠大於行星，質心的位置靠近恆星，並且恆星繞行質心的速度非常慢，若不考慮其他行星，僅以木星和太陽為例，太陽的質量大約是木星的一千倍，可以推算質心到木星的距離是太陽的一千倍

( $M_{\text{太陽}} D_{\text{太陽}} = M_{\text{木星}} D_{\text{木星}}$ )。根據第四章的

《牛頓第三運動定律》，在沒有其他外力的情況下，由於動量守恆，恆星繞行質心的動量加上行星繞行質心的動量等於

零( $M_{\text{太陽}} \mathbf{V}_{\text{太陽}} + M_{\text{木星}} \mathbf{V}_{\text{木星}} = 0$ )，同樣僅

以太陽木星為例，太陽繞質心的軌道速度(15m/s)只有木星的千分之一，如果是太陽和地球，則太陽的速度只有 10cm/s。



圖 1、恆星和行星透過相互的萬有引力吸引，共同繞著質心運動

因此除了直接看系外行星，天文學家透過恆星和行星之間的運動變化也可以找到系外行星，一個變化是恆星位置的改變，例如離我們 20 光年的 VB 10，在長達九年的紀錄，推測旁邊有一顆 6.7 倍木星質量的行星(Pravdo & Shaklan, 2009)。另一個變化是恆星繞質心的運動速度，在天文觀測中，徑向速度的測量全靠都卜勒效應。

在高一基礎物理第六章《波》和高三上的第二章《聲波》都有提到都卜勒效應，高一基礎物理主要是定性的描述，高三上則是定量的解釋，尋找系外行星則是運用光的都卜勒效應。都卜勒效應主要是發射源和觀測者之間的相對運動造成觀測者看到光波長的改變，此處所用的光波是指星光中的光譜線，例如氫。原子光譜線對中學生而言是不易懂的概念，需要量子物理的協助。在高一基礎物理的第八章《量子現象》提到原子光譜的定性描述，並且在高三下的第十一章《原子結構》對氫原子光譜線有定量陳述。由於母恆星繞著質量中心運轉，若從側面(edge-on)觀測，母恆星會有靠近我們和遠離我們的運動變化，而特定光譜線因為都卜勒效應而有相對應

的藍移和紅移變化，進而推算出視向速度出現類似正弦波的起伏改變，間接推論有系外行星存在。

### 三、行星凌

天文學家也利用光度學(photometry)的方法找尋系外行星。當行星從母恆星和我們之間的視線經過，會遮掩恆星的星光，造成亮度的變暗(如圖 2)，變暗現象的週期出現和行星公轉週期一致，從變暗的程度，變暗的延續時間以及公轉週期可以推算行星的大小、軌道半徑等物理量。

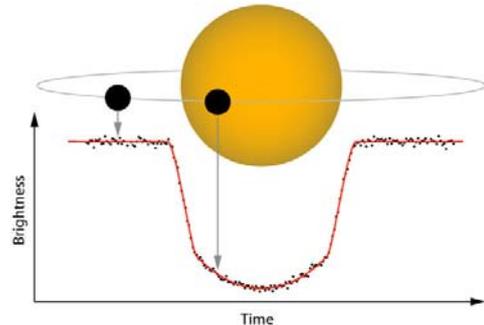


圖 2、行星凌示意圖，橫座標是時間、縱座標是觀測恆星的亮度(credit:夏威夷大學天文所)

### 參、行星凌模型

#### 一、原理

我們藉由光敏電阻的特性，製作了一個可記錄亮度的接收器。我們將光敏電阻所量測的電壓訊號經過類比轉數位轉換器，先轉成數位資料，然後透過 USB 傳導線傳送給電腦，由電腦紀錄偵測的原始資料，並從電腦螢幕顯示亮度隨時間的變化。

#### 二、成果

根據行星凌的原理，我們大約花費新台幣 1700 元做出一套演示原型(如圖

3), 恆星以燈泡替代, 並用馬達帶動行星, 左右來回擺動, 持續地遮掩代表恆星的燈泡, 演示行星凌的過程。

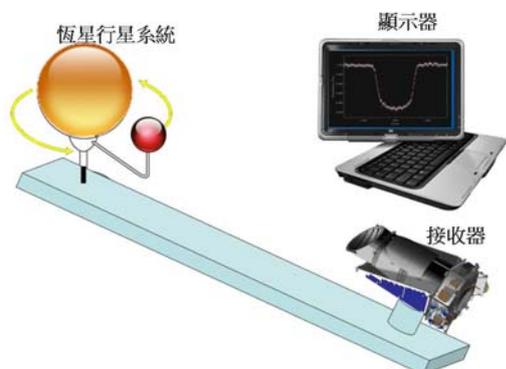


圖 3、上圖是行星凌模型示意圖, 下圖是演示成品, 下圖右邊是行星系統模型、左邊是偵測器, 偵測器後方的黑盒子是類比轉數位轉換器, 並直接連接電腦(模型製作: 黃品淞)

圖 4 是將電腦記錄的數位資料, 透過繪圖軟體 gnuplot 畫出。紅線條代表燈泡亮度隨時間的變化, 我們可以很清楚看到在橫座標 29.5 處, 亮度開始下降, 31.7 處達到最低點, 之後逐漸上升到 34.5 處。此一現象和行星凌的觀測一致。

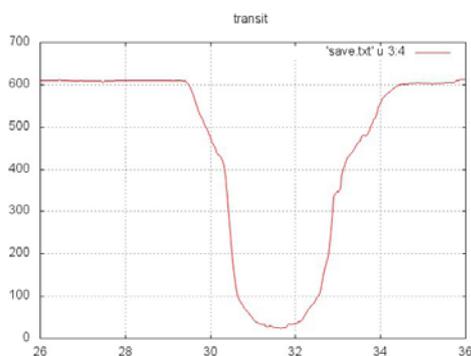


圖4、實際記錄的結果, 橫座標是相對時間, 縱座標是相對亮度變化

## 肆、改進與展望

根據經驗, 中學物理對學生來說是枯燥乏味, 並且不易學習和理解, 有些內容則不容易在日常生活中找到應用。本文藉由尋找系外行星這個吸引人的議題, 導入中學物理的內容, 利用課本所學的基本物理, 實際應用到天文學上。

其次從整合的觀點入手, 統整中學物理課本幾個章節內容, 將牛頓運動定律、克卜勒行星運動定律、光譜和都卜勒效應融入尋找系外行星的課題, 將課本所學的物理原理應用到遙遠的宇宙角落。

最後, 並設計行星凌演示模型, 由馬達轉動行星模型, 呈現行星的軌道運動, 藉由光敏電阻紀錄亮度的變化, 並將結果即時傳送電腦, 以圖形方式顯示在電腦螢幕, 學生可以對天文學家如何利用行星凌的方式找尋系外行星有了具體且完整的概念。

未來將改良馬達轉動, 使得原設計的行星往返轉動改成繞恆星的圓周運動, 並設計可調式轉速, 演示不同的軌道週期。期望藉由各種不同參數的改變, 能夠真正從演示的數據中, 進行行星各個參數的計算(George, 2011)。

## 誌謝

感謝中央研究院天文及天文物理研究所的補助, 以及資訊同仁黃品淞先生在模型上的協助製作, 使本研究得以順利完成。

## 參考文獻

1. Pravdo, Steven H.;Shaklan, Stuart B.(2009), *An ultracool Star's Candidate Planet*, *ApJ*, 700..623P
2. George, Samuel J, *Extrasolar planets in the classroom*, *Phys. Edu.*, 46..403